

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СКОРОСТИ РОСТА ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ МЕДИ ИЗ ЕЕ РАСПЛАВА НА СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКЕ

Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Дубская Т.Я., Егорова Л.Г.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет
имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

В данной работе предложен простой и эффективный теплофизический метод расчета скорости движения фронта кристаллизации медного покрытия на стальной проволоке. На основе этого метода проведена оценка погонной массы меди, осажженной на проволоке. Расчетная величина погонной массы меди достаточно хорошо согласуется с экспериментом. Кроме этого в работе установлено, что погонная масса осажженной меди пропорциональна длине ванны с расплавом меди, градиенту температуры на фронте кристаллизации и обратно пропорциональна скорости прохода проволокой расплава меди. Анализ полученного решения показал, что определяющей величиной для получения заданной толщины покрытия является время погружения проволоки в расплав меди. Время погружения проволоки задает характер изменения градиента температуры на фронте кристаллизации.

Ключевые слова: жидкофазный метод, омеднение, покрытие, расплав меди, фронт кристаллизации, стальная проволока.

In this paper we propose a simple and efficient method for calculating thermophysical speed crystallization front copper coating on steel wire. On the basis of this method is evaluated linear mass deposited on the copper wire. The estimated value of the mass per unit length of copper is in good agreement with experiment. In addition we found that the mass per unit length is proportional to the length of the deposited copper bath with molten copper, the temperature gradient at the crystallization front and inversely proportional to the rate of passage of molten copper wire. Analysis of the solution showed that determines the amount to obtain the desired thickness of the coating is a dive into the molten copper wire. The dive wire sets the variation of the temperature gradient at the crystallization front.

Keywords: The liquid-phase method, copper plating, coating, melt copper, the crystallization front, steel wire.

Метод омеднения – жидкофазный, т.е. омеднение осуществляется посредством погружения проволоки в расплав меди с последующим извлечением ее из расплава через заданное время (время погружения – τ_n).

Время погружения определяется: а) скоростью движения проволоки через расплав – V_n , б) длиной проходной ванны с расплавленным металлом – l_b , т.е.

$$\tau_n = \frac{l_b}{V_n}.$$

Кроме времени погружения на формирование толщины покрытия (установлено экспериментально) влияют:

– температура расплава – T_p ,
 – градиент температуры, на фронте кристаллизации – $\frac{dT}{dr}$,

– теплофизические характеристики (a , λ , c) покрываемого материала и кристаллизующегося расплава.

З а д а ч а . Рассчитать скорость роста толщины формирующегося медного покрытия на стальной проволоке жидкофазным методом, если длина ванны с расплавленным металлом – l_b , скорость движения проволоки через расплав – V_n , температура расплава – T_p . Проволока, входящая в расплав, имеет температуру T_n (соответствует окружающей среде). Теплопроводность металла проволоки (λ_{Fe}) и кристаллизующейся меди (λ_{Cu}) определяются экспериментально, плотность кристаллизующегося металла $\rho = 8850 \text{ кг/м}^3$, скрытая теплота кристаллизации меди $q_k = 213 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$.

Прежде чем решать поставленную задачу, необходимо оговорить ряд допущений и предположений.

1. Процесс образования покрытия на проволоке идет в два этапа:
 – во-первых, временем прохождения ее расплавленной ванны,
 – во-вторых, при выходе проволоки из расплава и охлаждении жидкого металла на ней в окружающую среду.
2. Пока проволока находится в расплаве, теплоотвод от фронта кристаллизации, кристаллизующегося на проволоке расплава, идет через материал покрываемого изделия.
3. Температура кристаллизации постоянна.
4. Рост толщины покрытия, формирующегося при нахождении проволоки в расплаве, определяется скоростью движения фронта кристаллизации.
5. Дополнительный прирост толщины покрытия идет вне расплава, за счет выноса проволокой жидкого металла при выходе ее из расплава и его кристаллизации.
6. Время нахождения проволоки в ванне с жидким металлом (τ_n) должно быть таким, чтобы $\frac{dT}{dr}$ между расплавом и центром проволоки не был равен нулю, это будет тогда, когда температура фронта ($T_{фк}$) кристаллизации покрытия будет больше, чем температура на осевой линии проволоки (T_n), т.е. $T_{фк} \gg T_n$, что достигается выбором времени погружения (τ_n), т.е. скоростью движения проволоки через расплав, и временем диффузии изотермы кристаллизации от центра проволоки (τ_d).
7. Диффузионные процессы, которые формируют переходной слой между металлом и покрытием, в данной задаче не рассматривается, так как этот слой влияет больше на адгезионные свойства покрытия, чем на его толщину.

Ванну с расплавленным металлом и погруженной в нее проволокой будем считать термодинамической системой, находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Схематическое представление данной термодинамической системы представлено на рис. 1.

Выделившаяся от кристаллизации теплота dQ_1 , отводится в объем проволоки через покрытие толщиной δ ,

$$dQ_2 = -\lambda_{\text{эф}} \frac{dT}{dr} S_{\text{пок}} \cdot d\tau, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность среды: проволока–покрытие;

$\frac{dT}{dr}$ – градиент температуры в направлении проволока–покрытие–рас-

плав.

Необходимым условием кристаллизации со скоростью $V_{\text{кр}}$ является условие:

$$dQ_1 = dQ_2,$$

учитывая формулы (1) и (2) получим

$$V_{\text{кр}} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{q_{\text{к}} \rho_{\text{пок}}} \cdot \frac{dT}{dr}. \quad (3)$$

Эффективная теплопроводность ($\lambda_{\text{эф}}$) может быть найдена из того, что тепловое сопротивление системы покрытие–проволока, равно

$$\Omega = \Omega_{\text{пр}} + \Omega_{\text{пок}},$$

или

$$\frac{1}{\lambda_{\text{эф}}} = \frac{1}{\lambda_{\text{пр}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{пок}}},$$

т.е.

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_{\text{пок}} \cdot \lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{пок}} + \lambda_{\text{пр}}}. \quad (4)$$

Тогда с учетом (3) и (4) скорость движения фронта кристаллизации в сторону расплава имеет следующий вид:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\lambda_{\text{пок}} \cdot \lambda_{\text{пр}}}{q_{\text{к}} \rho_{\text{пок}} (\lambda_{\text{пок}} + \lambda_{\text{пр}})} \cdot \frac{dT}{dr}. \quad (5)$$

Далее рассчитаем прирост массы покрытия за время $d\tau$:

$$\Delta m = \rho_{\text{пок}} \Delta V_{\text{пок}} = 2\pi \rho_{\text{пок}} r l V_{\text{кр}} d\tau = 2\pi \rho_{\text{пок}} r l \delta, \quad \delta = V_{\text{кр}} d\tau, \quad (6)$$

где $\tau = l/V_{\text{пр}}$ – время нахождения проволоки в расплаве.

Учитывая (4), (5) и (6) получим окончательное выражение для массы закристаллизовавшейся массы меди на проволоке длиной l_b , проходящий расплав меди со скоростью V_n :

$$\Delta m = 2\pi\rho_{\text{пок}}rl_b^2 \frac{\lambda_{\text{эф}} dT/dr}{q_k V_n}. \quad (7)$$

Кроме общей массы покрытия (7) можно ввести погонную массу, т.е. массу покрытия, приходящуюся на единицу длины покрываемой проволоки:

$$g = \frac{\Delta m}{l_b} = 2\pi\rho_{\text{пок}}rl_b \frac{\lambda_{\text{эф}} dT/dr}{q_k V_n}. \quad (8)$$

Как видно из выражения (8), массу покрытия можно увеличивать или уменьшать, если иметь возможность изменять длину ванны с расплавом (l_b), градиент температуры от оси проволоки до фронта кристаллизации (dT/dr) и скорость прохода проволокой ванны (V_n) с расплавом длиной l_b .

Используя справочные данные, скорость фронта кристаллизации:

$$V_k = \frac{47}{213 \cdot 10^3 8850} \cdot \frac{dT}{dr} = 25 \cdot 10^{-9} \frac{dT}{dr} = 250 \cdot 200 \cdot 10^3 \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Толщина покрытия за время $\tau_n = l_b / V_n$

$$\delta = V_k \tau_n = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,1}{1,7} = 0,29 \text{ мм.}$$

Объем покрытия

$$V_{\text{пок}} = l_b 2\pi \cdot r \cdot \delta = 0,1 \cdot 6,28 \cdot 1,83 \cdot 2,94 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} = 3,38 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Масса покрытия на длине l_b

$$\Delta m = \rho_{\text{пок}} V_{\text{пок}} = 8850 \cdot 3,38 \cdot 10^{-7} = 29913 \cdot 10^{-7} \text{ кг.}$$

Итак, при заданных выше скоростях прохода данной проволокой расплава длиной в 0,1 м расчетная толщина покрытия должна быть $\delta = 0,29$ мм, а погонная масса покрытия меди

$$g = \frac{\Delta m}{\Delta l} = 29,9 \text{ г/м.}$$

Вывод

Предложенный метод расчета процесса омеднения и полученные из него аналитические формулы вполне адекватно описывают реальные процессы омеднения стальной проволоки. Экспериментальные данные дают

$$g_{\text{экс}} = \frac{\Delta m}{\Delta l} = 32 \text{ г/м.}$$

Список использованных источников

1. *Цинкование. Справ. изд. Проскуркин Е.В., Попович В.А., Мороз А.Т. – М.: Металлургия, 1988. – 528 с.*
2. *Дубский Г.А., Егорова Л.Г., Бондаренко Е.Г. Математическое моделирование теплофизических процессов в слоистых структурах. Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – Ч. I. – С. 156–160.*